

Nano-sec rise time을 갖는 Rogowski코일의 제작

이 용 우 , 이 주 의  
경희대학교 전자공학과

CONSTRUCTION OF MEASURING ROGOWSKI COIL OF NANO-SEC RISR TIME

Yong-Woo Yi, Choo-Hie Lee

Dept. of Electronic Engineering, Kyung Hee Univ.

Abstract

This paper describes the experiment and design of Rogowski - wound coil used to measure a pulsed current with pulsewidth on the order of 100nsec in the kiloampere range.

Radius of coil is 2.75cm, total number of turns are 25 and cross-sectional area is 1 cm . The coil have 3ns rise time, 0.2nsec transit time and sensitivity is 4V/kA.

I. 서 론

짧은 Rise time 과 Duration을 갖는 전자 빔 장치와 방전 레이저장치의 대전류를 측정하기 위한 연구가 계속되어 왔다[1]. 이와같은 측정방법에는 Shunt 를 이용한 방법 [2], Current Transformer[3], Rogowski 코일 [1],[4] 과같은 측정방법이 이용되고 있다.

1912년 독일의 W.Rogowski에 의해 제시된 Rogowski코일은 고전압, 대전류의 도체와 직접적인 연결없이 측정할수 있는 장점을 지니고 있다. 따라서 Rogowski 코일은 수십ns의 Rise time 을 갖는 대전류 측정에 사용된다.

Rogowski코일에 의한 전류 측정 방법에는 크게 미분형과 적분형으로 나눌수 있는데, 본 연구에서는 37ns의 Rise Time 을 갖는 RLC 회로에서 코일전압을 측정하고, 적분기를 통해 입력전류 I(t)에 대한 출력전압을 측정하였다. Rogowski코일은 3nsec의 rise time 을 갖고, sesitivity가 4V/kA인 미분형 Rogowski코일을 제작하였다.

II. 미분형 Rogowski코일 [5]

그림 - 1에서 Rogowski코일의 증상에 대전류가 흐를때 자속 ϕ에 의해 유기된 전압을 전류에 대해 나타내면 식(1) 과 같다.

$$1/R \times d\phi/dt = L/R \times dI_c/dt + I_c \quad (1)$$

위 식(1)로 부터

$$1/L \times d\phi/dt = dI_c/dt + R/L \times I_c \quad (2)$$

가 됨을 알수있다.

미분형 Rogowski코일은 코일 증상으로 흐르는 전류의 필스폭에 비하여 코일의 감쇄 시간 L/R 이 매우 짧은 경우로 (2) 식에서

$$L/R \times dI_c/dt \ll I_c$$

이므로 코일의 출력전압은  $R I_c = dt/d\phi$  가 됨을 알수있다. 즉 이 측정장치는 미분형이 되므로 코일의 출력전압은  $d\phi/dt$  에 비례한다. 이 코일전압이 대전류 I에 비례하기 위해서는 코일전압이 RC적분기를 통해 오실로스코프로 측정되어야 한다. 이 장치는 구조가 간단하고, 주어진 코일 단면적에 높은 출력을 발생시킨다.

이 미분형태의 코일에 유기되는 전압은

$$V_c(t) = ( \mu n A / 2\pi r_o ) \times (dI/dt) \quad (3)$$

A = cross-sectional area of the coil winding coil.

I = Current to be measured.

n = total number of turns on the coil

r\_o = mean radius of the coil from current-carrying conductor.

그림-2의 등가회로에서 출력전압  $V_{int}$ 는

$$V_{int} = (1/RC) \times \int V_c(t)dt \quad (4)$$

이므로, (3) 식을 (4) 식에 대입하면

$$V_{int} = (\mu n A / 2\pi r_0 RC) \times I \quad (5)$$

가 됨을 알수 있다.

0. 코일의 전류 Rise time [ 6 , 7 ]

Rogowski의 rise time 은

$$= 2 r_0 / \sqrt{3} \tau v$$

$$\tau = \sqrt{pC(pL + R1)}$$

$$v = (L' \cdot C')^{-1/2}$$

$L'$ 와  $C'$ 는 단위 길이당 인덕턴스와 캐패시턴스이며,  $R1$ 은 코일의 저항이다. 여기서 계산된 Rise time 은 3nsec이다.  $v$ 는 코일내에서 전파속도이다.

III. Rogowski 코일의 제작

제작된 Rogowski코일의 제원은 다음과 같다

Rogowski 코일의 규격	
평균 반지름	$r_0 = 2.75 \text{ cm}$
코일의 단면적	$A = 1.0 \text{ cm}$
Wire의 직경	$d = 0.4 \text{ mm}$
권수	$N = 26 \text{ 회}$
내부 인덕턴스 ( $\mu n A / 2\pi r_0$ ) 코일의 저항 ( $R_0 (p \times l/A)$ )	$L = 491.6 \text{ nH}$ $0.2 \text{ m}$
적분기의 규격	
충단 저항	$Z_0 = 50$
적분기의 저항	$R = 5.2 \text{ k}$
적분기의 캐패시터	$C = 1 \text{ nF}$
시정수	$RC = 5.2 \text{ usec}$

최와같은 조건에 의해 Sensitivity 를 구하면

$$V_{coil}(t) = N A \mu / (2\pi r_0 RC) \times I(t)$$

$$= 4.0 \times 10^{-4} I(t)$$

이 장치는 Lucite( $\mu = 1$ ) 재질의 동근 코리에 코일을 감고, 외부의 전자파 간섭을 막기 위해 구리로 차폐하였다.

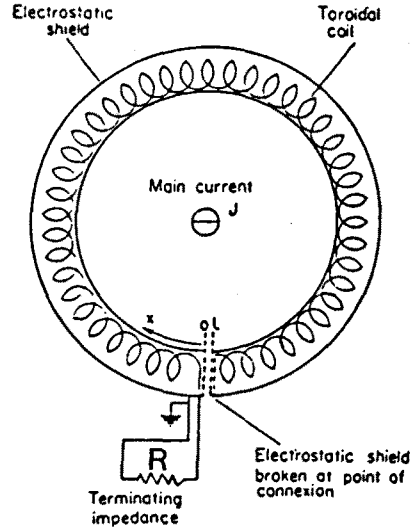


Fig.1. Rogowski coil with terminating impedance R.

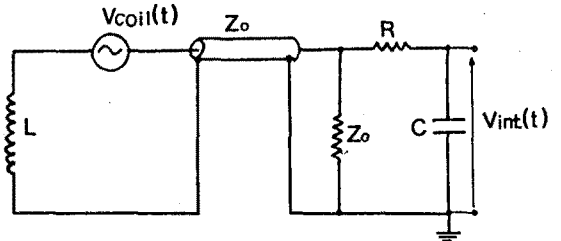


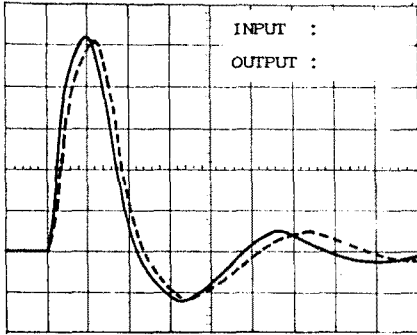
Fig.2. Schematic of detector circuit. Integrator shown is normally 5.2 usec integrator.

IV. 실험 및 결과

표 -1. Experimental Results.

RC (C=1nF)	Rise time	오 차
2.2 usec	40 nsec	0.5 %
5.2 usec	44 nsec	0.67 %
10 usec	51 nsec	6.0 %

제작한 Rogowski코일의 Calibration 은 코일의 증상으로 흐르는 RLC 회로의 전류  $I(t)$ 를 적분기를 통해  $V_{int}(t)$  측정함으로써 전류  $I(t)$ 에 대한 진폭의 오차와 최고값까지의 지연시간을 알수있다. 표 -1에 적분기의 시정수 RC에 따른 진폭의 오차와 지연시간을 나타냈다.



(a) Input Pulse Current  
and Output Current Waveform  
(100 A/div, 50 ns/div)

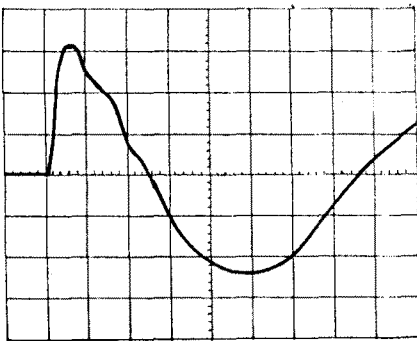


Fig.3. (b) Output Voltage of Coil  
(  $V_{coil} = dI/dt$  )  
(100 V/div, 20 ns/div)

실험에서는 37 ns의 Rise time 과 110 ns의 펄스폭을 갖는 전류 발생장치를 사용했다. 그림 -3 (a) 에서 520 A의 입력값에 대해 코일전압 ( $V_{coil}$ )은 그림 - 3(b)와 같이 전류 I의 미분형인  $dI/dt$ 에 비례한다. 그림(a)의 점선은 시정수가  $RC=5.2\mu s$ 인 적분기를 통해 측정된 전류 파형으로 최대값은 510 A이고, 최대값에서 3ns의 최상 Delay가 있음을 알수있다.

#### IV. 결 론

외 실험에서 Rogowski코일을 이용하여 전류 발생장치의 출력펄스를 측정하였다. 이 결과로부터 측정된 코일전압 ( $V_{coil}$ )은 입력 전류의 미분형인  $dI/dt$ 에 비례함을 알수 있으며, 적분기를 통한 출력전압( $V_{int}$ )은 입력전류 I에 비례함을 알수있다.

제작한 Rogowski코일은 표 - 1에서처럼 시정수(RC)가 2.2 us일때 오차가 0.5%이지만 10us일때 6.0%로 오차가 커지고, 출력 파형의 Rise time 이 늦어진다.

시정수(RC)가 2-8 us 일때, 펄스 Duration이 100-500 ns의 펄스를 측정할수 있으며,  $RC < 1\mu s$  일때, 100ns 이하의 펄스 Duration을 갖는 전류를 측정할수 있다. 10ns 이하의 rise time 을 갖는 전류를 측정하기 위해서는 1 ns이하의 rise time 을 갖는 Rogowski코일의 개발이 요구된다.

\*\*\*\*\* 참고 문헌 \*\*\*\*\*

- [1] C.A.Ekdahl; "Voltage and current sensor for high - density Z - pinch experiment "R.S.I.58(8) ,p1382,1987
- [2] Rev.Sci.Instrum.51(12),p1645,1980
- [3] BEHZ,W.;Die Messtrandler,Braunch Weigi Friedrich Vieweg,1950(Instrument trans - former)
- [4] W.Rogowski and W.steinhou, Arch,Electro tech.,voll,p141,1912
- [5] Donald G.Pellinen,marco S.Dicapua,etc, R.S.I.,51,p1535,1980
- [6] J.Cooper,Plasma Physics,vol 5,p285,1963
- [7] W.Stygar and G.Gerdin;" High frequency Rogowski coil responce characteristics" IEEE Trans.on Plasma Sci.,10(1),p40(1982)